

بررسی تاثیر انجماد با نیتروژن مایع بر خصوصیات مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای SP-SM و ریزدانه CL-ML

پژمان کاظمی^{۱*}، محمد رضا نیکودل^۲، ماشا... خامه چیان^۳

۱- کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

kazemi8514@gmail.com

چکیده:

کاهش دمای خاک و رساندن دما به زیر نقطه انجماد آب موجود در حفرات باعث بهبود خصوصیات مقاومتی خاک می شود. برای انجماد خاک از روشها و مواد گوناگونی استفاده می شود. یکی از این مواد نیتروژن مایع می باشد. نیتروژن مایع دارای دمای تبخیر ۱۹۶- سانتی گراد می باشد و با گرفتن گرمای زمین باعث انجماد آب موجود در حفرات آن می شود. سرعت انجماد با نیتروژن در خاک های با دانه بندی مختلف متفاوت می باشد. در این تحقیق دو نوع خاک ماسه ای SP-SM و خاک ریزدانه CL-ML توسط نیتروژن منجمد گردیدند. نتایج نشان دادند که انجماد در هر دو نوع خاک باعث افزایش مقاومت تراکمی تک محوری آن ها می شود. همچنین مشخص شد که سرعت انجماد در خاک ماسه ای بیشتر از خاک ریزدانه می باشد و میزان مصرف نیتروژن نیز در خاک ماسه ای کمتر از خاک رسی می باشد.

کلمات کلیدی: انجماد خاک، مقاومت تراکمی تک محوری، نیتروژن

Key words: ground freezing, uniaxial compressive strength, nitrogen

۱- مقدمه:

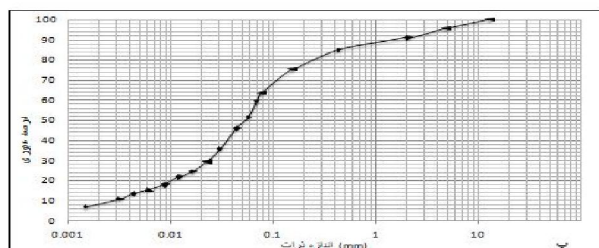
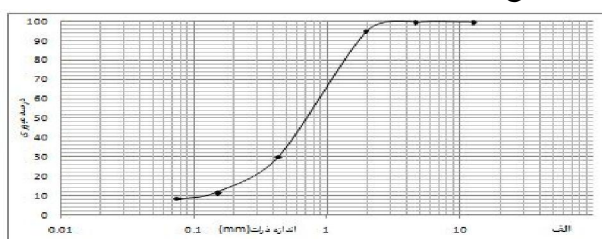
اجرای پروژه های عمرانی در زمین های سست مستلزم بهسازی ویژگی های مهندسی آن ها می باشد. یکی از مسائل مهم در بسیاری از پروژه های عمرانی، مخصوصا در زمینهای اشباع از آب، مسئله ی هجوم آب به محدوده ی سازه در حال ساخت است. براین اساس روشهای مختلفی برای بهسازی این خاک ها وجود دارد، این بهسازی می تواند موقت (برای زمان اجرای پروژه) و یا دائمی باشد. یکی از راهکارهای ایجاد پایداری موقت در زمین های سست و اشباع، منجمد نمودن خاک اشباع می باشد (Andersland and Ladanyi, 2004). انجماد زمین همچنین یکی از روش های معمول پایدارسازی ترانشه ها و سازه های زیر زمینی مانند تونل سازی و گودبرداری هایی است که در زیر سطح آب زیرزمینی انجام می گیرند (Sopke and Aluce, 2005). از آنجا که انجماد آب باعث افزایش حجم آب به میزان ۹٪ می شود و این افزایش حجم باعث تغییر در خصوصیات زمین شناسی مهندسی خاکها، مانند مقاومت تراکمی تک محوری، مدول الاستیسیته خاک می شود (Rehman, 1998)، لذا تعیین میزان این تغییرات و اثرات ناشی از آنها، می تواند به شناخت روش مناسب پایداری سازه مورد نظر کمک کند (Beskow, 1935; Jumikis, 1966; Tsytoovich, 1975; Knutsson, 1985). این روش بیش از یک قرن است که در دنیا مورد استفاده قرار می گیرد (Johansson, T., 2009). انجماد مصنوعی زمین به عنوان یک روش بهسازی موقتی زمین یا برای آب بندی موقتی مورد استفاده قرار می گیرد. اساس این روش تبدیل آب منافذ خاک به یخ می باشد. بعد از انجماد آب در منافذ خاک، پایداری خاک به نحو چشمگیری افزایش می یابد، همچنین یخ باعث ایجاد یک لایه نفوذناپذیر در منطقه مورد نظر می شود که از جریان آب جلوگیری می کند. دو روش اصلی برای انجماد زمین وجود دارد (Rehman, 1998): روش انجماد غیر مستقیم: این روش به صورت یک سیستم بسته و توسط شور آب (کلسیم کلراید) انجام می شود. روش انجماد مستقیم: این روش به صورت یک سیستم باز عمل می کند که در آن نیتروژن مایع به درون لوله های انجماد

تزریق می‌شود و پس از جذب گرما و تبدیل شدن به بخار از لوله خروجی وارد اتمسفر می‌شود. در سیستم باز از نیتروژن مایع در دمای ۱۹۶- سانتی گراد استفاده می‌شود. هنگامی که از روش مستقیم استفاده می‌شود، نیتروژن به درون لوله‌ها پمپ می‌شود و با گرفتن گرمای اطراف لوله‌ها، گرم و تبدیل به بخار می‌شود سپس از طریق لوله خروجی وارد اتمسفر می‌گردد. روش مستقیم انجماد بر خلاف روش غیر مستقیم، یک سیستم باز می‌باشد (Jessberger, 1980).

۲- مواد و روش کار

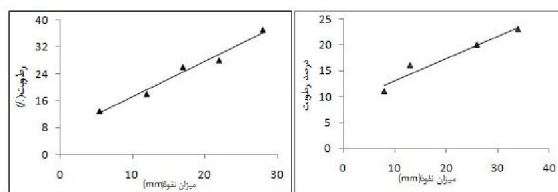
۲-۱ تعیین بافت خاک

در این تحقیق از دو نوع خاک ریزدانه و خاک ماسه‌ای استفاده شده است. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM-D422-63 انجام شده است. در شکل (۱) نمودار دانه بندی این دو نوع خاک آورده شده است.



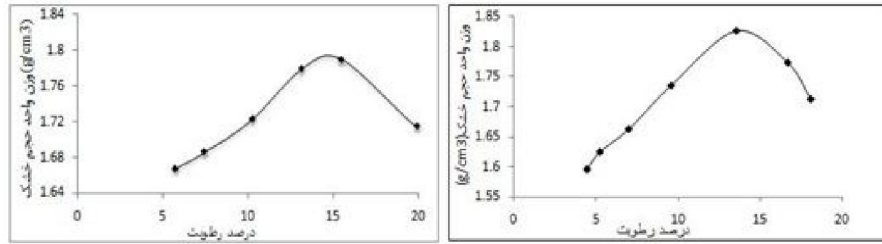
شکل (۱) نمودار منحنی دانه بندی خاک ماسه ای (الف) و ریزدانه (ب)

نمودار حد روانی خاک ریزدانه و ماسه ای با استفاده از آزمایش مخروط نفوذ در شکل (۲) نشان داده شده است که برای خاک ماسه ای ۱۶ و برای خاک ریزدانه برابر ۲۸ می‌باشد. حد خمیری خاک ریزدانه ۲۲ می‌باشد. خاک ماسه ای فاقد حد خمیری قابل اندازه گیری با دستگاه مخروط نفوذ می‌باشد.



شکل ۲- نمودار حد روانی خاک ماسه ای و خاک رسی

در آزمایش تراکم نمونه‌های خاک با درصد‌های رطوبت مختلف در قالب تراکم استاندارد با انرژی مساوی کوبیده می‌شود. در هر بار کوبیدن، وزن مخصوص مرطوب و درصد رطوبت نمونه اندازه‌گیری می‌شود وزن واحد حجم خشک خاک ریزدانه برابر $1/83 \text{ g/cm}^3$ و برای خاک ماسه ای $1/80 \text{ g/cm}^3$ می‌باشد شکل (۳).



شکل ۳- وزن واحد حجم خشک خاک ریزدانه (راست) ، وزن واحد حجم خشک خاک ماسه ای (چپ)

نتایج آزمایشات دانه بندی خاک ها در جدول (۱) آورده شده است. بر اساس طبقه بندی متحد خاک مشخص شد که خاک ریزدانه از نوع CL-ML و خاک ماسه ای نیز از نوع SP-SM می باشد.

جدول (۱): نتایج آزمایشات دانه بندی و نامگذاری خاک ها

خاک	وزن مخصوص خشک	W%	LL	PL	PI	درصد عبوری			چگالی حداکثر (بوتیقایید)	تام خاک
						رد شده از ۴ الک	رد شده از ۱۰۰ الک	رد شده از ۲۰۰ الک		
ریزدانه	۲۶۲	۷۱۶	۲۸	۲۲	۶	۷۹۶	۷۷۵	۷۵۹	۱.۸۲	CL-ML
درشت دانه	۲۶۵	۷۱۴	۱۶	-	-	۹۹.۹	۹۷	۹۱	۱.۸۰	SP-SM

بعد از مشخص شدن مشخصات فیزیکی خاک ها، مقدمات لازم برای انجماد با نیتروژن مایع شروع شد. برای انجماد خاک توسط نیتروژن از یک قالب استوانه ای به ارتفاع و قطر ۷۰ سانتی متر استفاده شده است. برای بدست آوردن تراکم مورد نظر ابتدا حجم قالب استوانه ای مورد نظر را بدست آورده و سپس با توجه به حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه، چگالی مرطوب خاک ها محاسبه گردید. بعد از محاسبه حجم و وزن واحد حجم مرطوب خاک، می توان وزن لازم خاک را برای تراکم ۱۰۰ درصد حساب کرده و سپس وزن لازم برای درصد تراکم مورد نظر را از روی آن حساب کرد. برای تعیین جرم خاک لازم برای هر درصد تراکم از رابطه (۱) استفاده شده است.

$$M = V \times \gamma_m \times \%R \quad (1)$$

M = جرم خاک = V = حجم نمونه گیر γ_m = وزن واحد حجم مرطوب خاک $\%R$ = درصد تراکم مورد نظر

۲-۲- ساخت مدل برای انجماد با نیتروژن

در این تحقیق برای انجماد نمونه ها به کمک نیتروژن مایع، ابتدا یک قالب استوانه ای با ارتفاع و قطر ۷۰ سانتی متر تهیه گردید. هر دو نوع خاک رسی و ماسه ای درون قالب با درصد تراکم ۷۵ درصد آماده گردیدند. همزمان با تراکم خاک ها درون قالب، دماسنج هایی با قابلیت اندازه گیری دما از $50^{\circ}C$ تا $70^{\circ}C$ و لوله های انجماد دوجداره که قطر هر لوله برابر ۵۰ میلی متر بود، نیز نصب گردیدند. با تزریق نیتروژن مایع به درون این لوله ها، انجماد خاک شروع گردید (شکل ۴).



شکل ۴ - مدل ساخته شده به همراه مخزن نیتروژن

۳- انجماد خاک ها در مدل به کمک نیتروژن مایع

برای تراکم ابتدا خاک را در لایه های ۲۰ سانتی متری درون قالب ریخته و سپس لوله‌ی انجماد همزمان با تراکم در خاک نصب گردید. دماسنج‌ها نیز در نقاط مختلف خاک و با فواصل مشخص از لوله انجماد نصب گردیدند تا نحوه‌ی تغییرات دمای خاک مورد نظر با گذشت زمان و در فواصل مختلف از لوله انجماد بررسی شود. برای خاک رسی فقط یک لوله انجماد را در مرکز قالب استوانه نصب شد و برای بررسی تغییرات دمایی از ۶ عدد دماسنج استفاده گردید؛ یکی از دماسنج‌ها در عمق ۴۰ سانتی متری از سطح خاک و به فاصله ۳ سانتی متر از لوله انجماد و دماسنج دوم نیز در عمق ۲۵ سانتی متری و به فاصله ۱۵ سانتی متر از لوله انجماد قرار داده شد. سپس دماسنج‌های دیگر در عمق ۲۵ سانتی متر و به ترتیب به صورت مماس با لوله، ۳، ۶، ۹ سانتی متر از لوله انجماد نصب گردیدند (شکل ۵). برای تراکم ماسه‌ای نیز ابتدا تا ارتفاع ۲۰ سانتی متری قالب استوانه‌ای خاک ریخته و سپس سه لوله دوجداره انجماد به صورت مثلثی و با زاویه ۱۲۰ درجه و به فاصله ۲۰ سانتی متر از هم (شکل ۶) در مرکز قالب استوانه‌ای نصب شده و تراکم خاک ادامه یافت. در مرحله اول، انجماد تنها با تزریق نیتروژن مایع به یک لوله دو جداره انجماد انجام شد، اما در مرحله بعد تزریق نیتروژن به هر سه لوله صورت گرفت. دماسنج‌ها برای حالت اول بر طبق جدول ۲ قرار داده شده اند.

جدول ۲- ترتیب قرارگیری دماسنج‌ها، عمق و فاصله آن‌ها از لوله انجماد و سطح خاک ماسه‌ای

شماره دماسنج	۱	۲	۳	۴	۵	۶
عمق دماسنج (cm)	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	در کف قالب (60 cm)	۲۵
فاصله از لوله (cm)	مماس	۳	۶	۹	مرکز سه لوله	مرکز سه لوله

بعد از نصب لوله‌ها و غرقاب کردن خاک و نصب اتصالات لازم برای انتقال نیتروژن مایع به لوله‌ی انجماد نصب شده درون قالب استوانه‌ای، انجماد خاک شروع شد و تغییرات درجه دماسنج‌ها در زمان‌های مختلف ثبت گردید. عمل انجماد تا منجمد شدن خاک‌ها و اندازه گیری شعاع انجماد ادامه یافت (شکل ۷).



شکل ۵- مدل ساخته شده برای خاک ماسه‌ای شکل ۶- مدل ساخته شده برای خاک رسی



شکل ۷- شروع تزریق نیتروژن به درون لوله انجماد در خاک ماسه‌ای

بعد از انجماد خاک‌ها، در فواصل گوناگون از لوله انجماد، آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری با نفوذسنج انجام شد (شکل ۸).

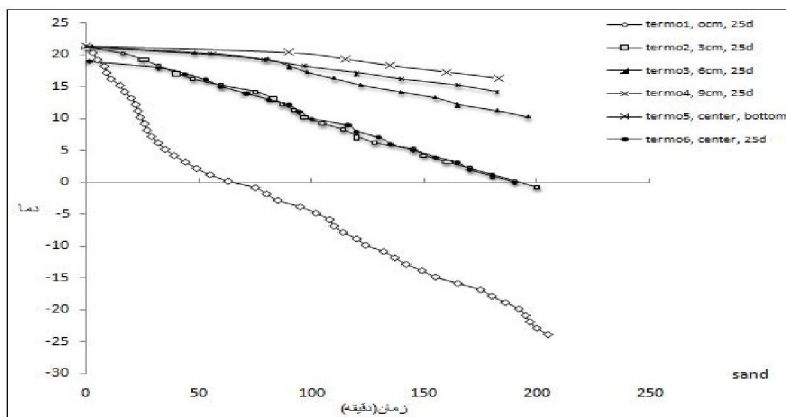


شکل ۸- اندازه گیری مقاومت تراکمی با پترومتر جیبی

۴- بحث و تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج آزمایشات انجام شده بر روی خاک ماسه ای در انجماد با نیتروژن

در خاک ماسه ای با شروع تزریق نیتروژن مایع به درون لوله انجماد، دمای خاک کاهش می‌یابد و با گذشت زمان، مقدار کاهش دما بیشتر می‌گردد؛ دماسنج‌هایی که به لوله انجماد نزدیک‌تر می‌باشند با سرعت بیشتری این کاهش دما را نشان می‌دهند. بعد از گذشت حدود ۲ ساعت از شروع تزریق نیتروژن به درون لوله انجماد، دمای دماسنج نصب شده در مجاورت لوله انجماد به صفر درجه سانتی‌گراد رسید و خاک اطراف لوله انجماد شروع به منجمد شدن کرد (شکل ۹). با کاهش بیشتر دمای خاک، میزان شعاع انجماد نیز بیشتر گردید و در دمای ۲۵- سانتی‌گراد، شعاعی به طول ۱۰ سانتی‌متر در اطراف لوله انجماد تشکیل گردید (شکل ۱۰).



شکل ۹- نمودار مقایسه ای زمان دما برای دماسنج‌های نصب شده در خاک ماسه‌ای

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله از لوله انجماد تغییرات دمایی دماسنج‌ها با شیب کمتری اتفاق می‌افتد و زمان لازم برای انجماد نیز بیشتر می‌شود. در اعماق بیشتر کاهش دما با سرعت بسیار کمتری نسبت به اعماق کمتر اتفاق می‌افتد که دلیل آن همان‌طور که در خاک‌های ریزدانه گفته شد، افزایش فشار ناشی از وزن خاک روباره آن می‌باشد که مانع تشکیل لنت‌های یخ و یا کم شدن سرعت تشکیل آن‌ها می‌شود.



شکل ۱۰- تشکیل شعاع انجماد در اطراف لوله‌ی انجماد نصب شده در خاک ماسه ای

برای اینکه شعاع انجماد افزایش یابد باید ماده سرد کننده بتواند گرمای بیشتری را از خاک انتقال داده و شرایط کاهش دما را برای آب موجود در منافذ با فاصله های بیشتر از لوله فراهم کند. در یک نوع خاک مشابه، هر چه شعاع انجماد بزرگ تر باشد، میزان مصرف نیتروژن نیز افزایش می یابد. انجماد خاک ماسه ای توسط نیتروژن نسبت به خاک رسی زمان کمتری نیاز دارد و مصرف نیتروژن نیز کمتر می باشد. نتایج حاصل از تغییرات مقاومت تراکمی قبل و بعد از انجماد خاک ماسه ای در جدول ۳- نشان داده شده است.

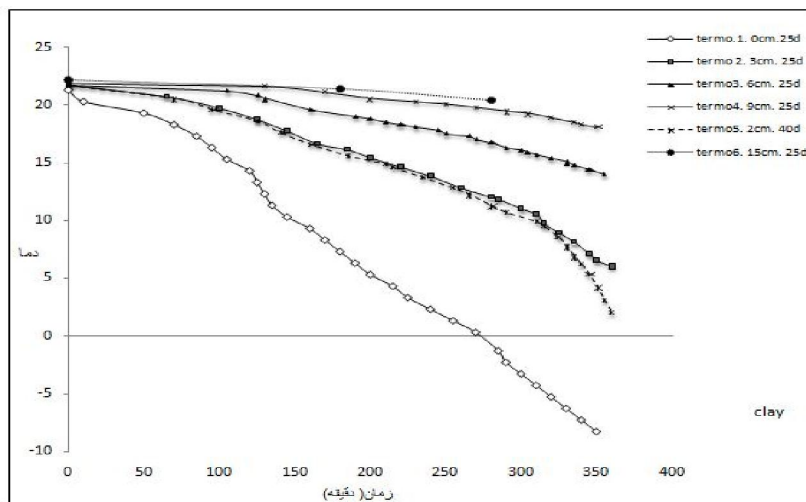
جدول ۳- مقایسه مقاومت تراکمی خاک ماسه ای قبل و بعد از انجماد با نیتروژن

فاصله از لوله انجماد (cm)	ماسه با لوله	۴	۸	۱۲
مقاومت قبل از انجماد (Kpa)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
مقاومت بعد از انجماد (Kpa)	>۶۰۰	>۶۰۰	>۶۰۰	۱۵۰

مقاومت تراکمی اندازه گیری شده برای خاک ماسه ای قبل از شروع تزریق نیتروژن به درون لوله های انجماد در فواصل مشخص شده در جدول (۳) برابر ۱۰۰ کیلو پاسکال بوده اما بعد از انجماد و زمانی که شعاع انجماد به ۱۰ سانتی متر رسید، در فواصل کمتر از ۱۰ سانتی متر، مقاومت خاک منجمد شده بسیار بالا و بیشتر از ظرفیت نفوذسنج بوده (بیشتر از ۶۰۰ کیلو پاسکال)، که این نشان دهنده تأثیر انجماد در افزایش مقاومت تراکمی خاک های فاقد چسبندگی مانند ماسه می باشد. در فاصله های بیشتر از ۱۰ سانتی متر مقاومت اندازه گیری شده با نفوذسنج مشابه قبل از تزریق نیتروژن یا دارای تغییرات اندک می باشد. در مدت ۴ ساعت تزریق نیتروژن مایع به درون لوله های دوجداره، میزان مصرف برابر ۳۰ لیتر می باشد. شعاع انجماد در اطراف لوله نیز ۱۰ سانتی متر و قطر لوله نیز ۵ سانتی متر می باشد بنابراین حجم خاک ماسه ای که با مصرف این مقدار نیتروژن مایع منجمد می شود برابر ۰/۰۲۸ متر مکعب می باشد که تقریباً سه برابر حجم خاک رسی می باشد که با مصرف ۴۵ لیتر نیتروژن مایع منجمد می شود. بنابراین نتیجه می شود که زمان و میزان مصرف نیتروژن برای انجماد خاک های ریزدانه بیشتر از خاک های درشت دانه می باشد.

۴-۲- نتایج حاصل از انجماد خاک رسی به کمک نیتروژن مایع

برای انجماد خاک ریزدانه، یک لوله دو جداره انجماد در مرکز قالب نصب و انجماد خاک با این تک لوله انجام شد. بعد از شروع انجماد و همزمان با کاهش دمای دماسنج ها، مشاهده گردید که با افزایش فاصله از لوله انجماد، میزان کاهش دما و همچنین سرعت آن بسیار کمتر می باشد که دلیل آن می تواند افزایش بار ناشی از وزن خاک بالایی و همچنین کمتر شدن تأثیر دما با افزایش فاصله از لوله های انجماد باشد. شعاع انجماد نیز در خاک های رسی در زمان مشابه بسیار کمتر از خاک های ماسه ای می باشد که به دلیل قابلیت متفاوت انتقال گرما در آن می باشد (Andersland and Ladanyi, 2004) شکل (۱۱). بعد از رسیدن دمای دماسنج مجاور لوله به نزدیک صفر درجه سانتی گراد، خاک اطراف لوله شروع به انجماد و سخت شدن نمود و با گذشت زمان شعاع انجماد نیز افزایش یافت شکل (۱۲). تشکیل شعاع انجمادی به طول ۵ سانتی متر از مجاور لوله انجماد حدود ۸ ساعت به طول انجامید و در حدود ۴۵ لیتر نیتروژن مایع نیز مصرف شد. برای تعیین مقاومت تراکمی هر دو نوع خاک قبل و بعد از انجماد، توسط نفوذسنج جیبی، مقاومت خاک قبل و بعد از انجماد و در فواصل مختلف از لوله انجماد اندازه گیری شد تا تأثیر انجماد در افزایش مقاومت خاک بعد از منجمد شدن نشان داده شود. در خاک رسی از مجاور لوله انجماد تا فاصله ۵ سانتی متری، خاک کاملاً منجمد شده و میزان مقاومت بیشتر از مقاومت نفوذسنج است اما در فواصل بیشتر از ۵ سانتی متر، میزان مقاومت کمتر خواهد شد که نتایج آن در جدول ۴- آمده است. بعد از انجماد خاک رسی مشاهده گردید که ترک هایی در اطراف لوله انجماد به وجود می آید، این ترک ها بیشتر در مرز بین قسمت منجمد خاک با بخش منجمد نشده آن مشاهده گردید و در فاصله های دورتر و غیر منجمد خاک، اثری از این ترک ها مشاهده نشده است. در خاک ماسه ای چنین ترک های دیده نشده است.



شکل ۱۱- مقایسه نمودار زمان- دما برای انواع دما سنج‌های نصب شده در خاک رسی



شکل ۱۲- تشکیل شعاع انجماد درون خاک رسی

برای تعیین مقاومت تراکمی خاک درون قالب مخصوص قبل و بعد از انجماد از پنترومتر جیبی استفاده شده است. برای این منظور در فواصل ۴، ۶ و ۸ سانتی متری از لوله انجماد نصب شده درون خاک، مقاومت خاک قبل و بعد از انجماد نیز توسط پنترومتر جیبی اندازه گیری شد که نتایج آن در جدول (۴) آورده شده است. همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، قبل از انجماد مقاومت اندازه گیری شده با نفوذسنج حدود ۲۰۰ کیلو پاسکال می باشد اما بعد از گذشت حدود ۸ ساعت از شروع تزریق نیتروژن مایع به درون خاک، مقاومت تراکمی اندازه گیری شده با نفوذسنج جیبی در فواصل کمتر از ۵ سانتی متری بیشتر از ظرفیت نفوذسنج بوده اما در فواصل بیشتر از ۵ سانتی متر، میزان افزایش کمتر بوده زیرا در این فواصل خاک هنوز منجمد نشده است.

جدول ۴- مقایسه مقاومت تراکمی اندازه گیری شده با نفوذسنج جیبی قبل و بعد از انجماد خاک رسی

فاصله از لوله (cm)	<۴	۶	۸
مقاومت خاک قبل از انجماد (K Pa)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
مقاومت خاک بعد از انجماد (K Pa)	>۶۰۰	۳۰۰	۲۰۰

در مدت ۸ ساعت، میزان مصرف نیتروژن برابر ۴۵ لیتر می باشد و با توجه به اینکه شعاع انجماد در اطراف لوله دوجداره برابر ۵ سانتی متر و قطر لوله نیز برابر ۵ سانتی متر می باشد، حجم خاک رسی که با مصرف ۴۵ لیتر نیتروژن مایع منجمد می شود برابر ۰/۰۰۹ متر مکعب می باشد.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که سرعت انجماد آب موجود در منافذ خاک ماسه ای بیشتر از خاک ریزدانه رسی می باشد که به علت نفوذپذیری و قابلیت بیشتر هدایت گرمایی خاک های ماسه ای نسبت به خاک های ریزدانه رسی می باشد. مقاومت تراکمی هر دو نوع خاک بعد از انجماد بیشتر از ۶ برابر مقاومت قبل از انجماد می باشد. نسبت افزایش مقاومت در خاک ماسه ای نسبت به خاک ریزدانه بعد از انجماد بیشتر می باشد، همچنین میزان شعاع انجماد در خاک ماسه ای در زمان مشابه بیشتر از خاک ریزدانه رسی می باشد. میزان مصرف نیتروژن در خاک ماسه ای و برای تشکیل یک ستون منجمد از خاک، بسیار کمتر از خاک ریزدانه رسی می باشد.

تشکر و قدردانی: لازم است از آزمایشگاه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس تشکر به عمل آید.

منابع:

- Andersland, O.B., Ladanyi, B. 2004. Frozen Ground Engineering, 2nd ed. Co-Published by American Society of Civil Engineers and John Wiley and Sons (ASCE Press)
- Beskow, G. 1935. Soil freezing and frost heaving. Stockholm: Statens Vaginstitut
- Chamberlain, E. & Gow, A. 1978. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soil. 1 int symp on ground freezing Germany, Bochum, 31-44.
- Johansson, T. 2009. Artificial Ground Freezing in Clayey Soils: Laboratory and Field Studies of Deformations During Thawing at the Bothnia Line, Halmstad University
- Jessberger, H. 1980. Theory and application of ground freezing in civil engineering. Review. Cold regions science and technology, 3, 3-27.
- Jumikis, A. 1966. Thermal soil Mechanics. New Brunswick, NJ: Rutgers univ press.
- Knutsson, S. 1982. Field study of instrumented gullies and manholes in frost susceptible soils, 3rd Int Symp on Ground Freezing, USA, Hanover, NH.
- Knutsson, S. 1998. Soil behavior at freezing and thawing. Dr thesis, LTU, Dep of Civ and Mining Eng.
- Pusch, R. 1979. Unfrozen water as a function of clay microstructure. engineering geology
- Rehman, E. 1998. Applied soil Reinforcement. report 3043. Dep of soil and rock engineering. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Sopko, J. & Aluce, G. 2005. Artificial ground freezing for environment remediation. www. Groundfreezing.com
- Tsytoovich, N. 1975. The Mechanics of frozen ground. Washington, DC: Scripta book co.